doi:10.13866/j.azr.2018.04.01

未来气候情景下塔里木河干流日径流过程模拟研究①

班春广[1,2], 陶 辉[1], 董义阳[1,2,3], 赵成义[1]

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘 要: 以塔里木河干流为研究区,运用分布式 MIKE SHE 水文模型,识别了日值尺度下塔里木河干流下垫面各参数,选取干流内 6 个气象站(阿拉尔、拜城、库车、轮台、库尔勒、铁干里克)1998—2007 年实测气象数据,依据干流 3 个水文站(新其满、英巴扎、恰拉)1998—2007 年实测数据对模型进行识别和验证,并结合 HadGEM 2 - ES 气候模式中气温和降水数据,预估了未来(2021—2050 年)气候情景下塔里木河干流径流演变特征。结果表明:① 运用 MIKE SHE 模型模拟塔里木河干流日径流过程,模型效率系数均达 0.72 以上,表明该模型适用性较强。② 未来 30 a 塔里木河干流多年月平均气温均较基准期(1981—2004 年)升高了 1.7 ~ 2.2 ℃,且夏秋季节升温较高;降水整体呈增加趋势,且春季增幅较大,秋季增幅较小。③ 未来气候情景下,各水文站年均径流量呈减少趋势,且以夏秋季节表现最为显著($P<0.01$)。其中,下游恰拉水文站平均径流量减少比例最大(5.04%),上游新其满水文站减少比例最小(0.6%);各气候排放情景中,RCP2.6(低排放情景)下各水文站减少量最小,RCP8.5 高排放情景下减少最大。未来气候情景下塔里木河干流年径流呈减少趋势,使区域水资源调配面临更大困难,生态安全面临更大威胁,同时也将加大区域人地关系矛盾。

关键词: 日径流模拟; 气候变化; MIKE SHE; 塔里木河干流

径流是水循环的基本环节,同时也是自然地理环境中最为活跃的要素。日径流的变化模拟与分析在农业灌溉[1]、工业需水、水资源配置与评价[2-4]等方面起着重要作用,可为决策者提供相关参考依据。目前,国内外学者在干旱区径流模拟方面开展了一系列的研究。在国外,Abushandi 等[5]利用 HEC-HMS 和 IHACRES 模型分别对 Wadi Dhulied 干旱区流域径流进行了模拟,表明 HEC-HMS 模拟效果优于 IHACRES;Worku 等[6]利用 GIS 和 SWAT 模型模拟了 Beressa 流域径流和沉积物对土地利用的响应,结果表明土地利用方式变化显著影响径流量和沉积物量。黄粤等[7]通过运用 MIKE SHE 水文模型模拟了开都河流域的日径流过程,表明 MIKE SHE 模型能够应用于干旱区;张永勇等[8]基于 SWAT 模型研究了石羊河中上游流域 1988—2005 年以及未来气候情景下出山口径流量的变化特征,探讨了未来气候变化对石羊河中上游地区水文情势以及水资源的影响。从以上文献及水文模型发展过程来看,干旱区径流模拟研究主要采用的模型包括 SWAT 模型、MIKE SHE 模型、TOPMODEL 模型、VIC 模型等。本文选取塔里木河干流为研究区域,采用 MIKE SHE 水文模型研究径流变化情况。MIKE SHE 水文模型较 SWAT 等其他模型而言,是一种具有物理基础的全分布式水文模型,能够用来模拟全部的水文过程,同时包含灌溉、水库、水工建筑物等优势功能。塔里木河干流受人类活动影响强烈,选取 MIKE SHE 模型具有明显优势,塔里木河干流有大面积的灌区,SWAT 模型在平原灌区应用时存在河网提取、人工干扰条件下的子流域和水文单元划分以及作物实际蒸散发量计算等问题[9],因此,本文采用 MIKE SHE 水文模型进行相关研究。

气候变化作为流域水资源演替的主导,在区域水文水资源调配、综合利用等方面具有重要影响。伴随着全球变暖、极端气候灾害频发等一系列气候

① 收稿日期: 2017 - 10 - 19; 修订日期: 2017 - 12 - 01
基金项目: 国家自然科学重点基金项目(U1403281,41671030);中国科学院重大仪器研制项目(Y52410);新疆维吾尔自治区高层次引进人才项目(Y642091)
作者简介: 班春广(1989 -),男,硕士研究生,主要从事生态水文研究. E-mail: banchunguang@163.com
通讯作者: 赵成义. E-mail: zcy@ms.xjb.ac.cn

变化现象，致使气候变化对水文水资源影响范围不断扩增，影响强度日益加大，国内外已有相关学者对此开展了相应研究。在国外，Christensen 等[10]根据降尺度模拟的气候情景，评估了气候变化对克罗拉多河流域水文水资源的潜在影响；Setegn 等[11]利用全球气候模式输出的结果研究了塔纳湖盆地水文水资源对气候变化的敏感性。在国内，张建云等[12]指出全球气候变暖和人类活动直接影响了水循环要素的时空分布特征，增加了极端水文事件发生的概率；刘昌明等[13]阐述了气候变化对水文水资源的主要影响，揭示了水资源系统对气候变化响应的主要特征及研究方法；陈亚宁等[14]指出气候变暖引起的水资源变化，将会使西北干旱区在资源开发利用过程中生态维护和经济发展的矛盾更加突出。塔里木河深居亚欧大陆内部，属典型干旱内陆河，而塔里木河干流是塔里木河水源的重要耗散区，由于塔里木河干流水资源相对紧缺，使得干流沿岸生态十分脆弱[15]。因此，研究未来气候变化下塔里木河干流径流演变特征对于沿岸社会经济的发展和生态环境的保护具有重要作用。本文通过运用 MIKE SHE 分布式水文模型模拟塔里木河干流日径流变化过程，探讨气温及降水将如何影响径流过程以及各河段水量分配，进而预估了未来 30 a 塔里木河干流各河段水量调配状况，旨在为塔里木河流域水资源配置及如何应对气候变化对径流影响提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河干流地理坐标为 81°13′～88°34′E，39°26′～41°32′N，海拔 779～1 031 m，面积约 4.1×10^4 km^2。塔里木河干流属典型干旱区内陆河，自身不产流，历史上发源于塔里木河盆地周边的 9 大水系都曾与塔里木河干流有着水力联系，但由于人类活动与气候变化的影响，现仅有阿克苏河、和田河、叶尔羌河和开都－孔雀河与塔里木河干流有水力联系，形成了目前“四源一干”的格局[15-16]。干流从肖夹克到台特玛湖全长 1 321 km，在阿拉尔、新其满、英巴扎、乌斯满、恰拉分别建有水文观测站，其中阿拉尔水文站多年平均来水量为 45.82×10^8 m^3，新其满水文站多年平均年径流量为 37.62×10^8 m^3，英巴扎水文站为 28.76×10^8 m^3，恰拉水文站为 6.78×10^8 m^3[17]。研究区气候为大陆性暖温带、极端干旱沙漠气候，年平均气温在 10.6～11.5 ℃，年降水量小于 50 mm，年蒸发量 2 300～3 000 mm，光照丰富，年日照时数为 2 800～3 100 h，无霜期为 185～210 d，多大风及沙尘暴天气，区内植被稀少，覆盖度低[18-20]。

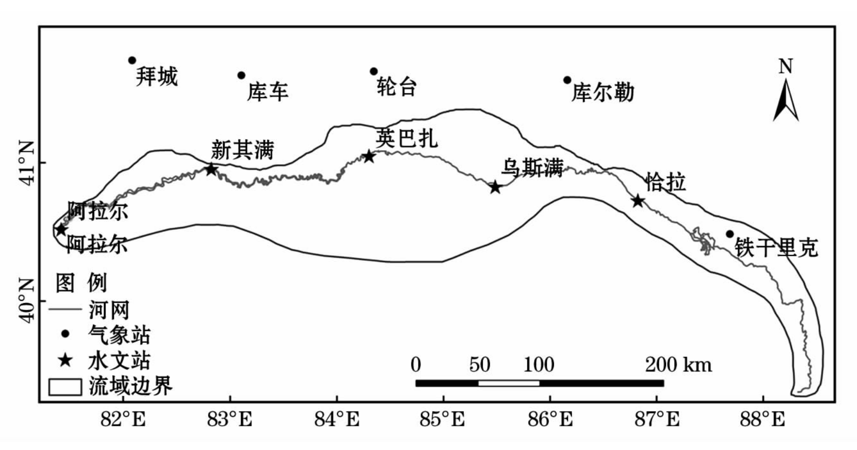


图 1 塔里木河干流边界、河网及观测站点分布

Fig. 1 Boundary, river network and rainfall stations in main stream of Tarim river

2 资料与方法

2.1 气候模式情景

第 5 次耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5，CMIP5）于 2013 年发布新一代温室气体排放情景—典型浓度路径（Representative Concentration Pathways，RCP），RCPs 各情景在 2100 年选择不同的辐射强迫目标[21]，主要包括 RCP 2.6（低排放情景）、RCP 4.5/6.0（中排放情景）及 RCP 8.5（高排放情景）共 4 种排放情景。本文采用英国气象局哈德莱中心 HadGEM2－ES 模式数据，假设该模式对当前气候模拟的优劣可能会影响对未来气候变化的预估结果，因此要检验 HadGEM2－ES 基准期的气温及降水数据在该流域降尺

度的结果[22],经检验得出气温误差较小,降水相对误差较大。为了提高模式数据精度,本文采用 Delta 方法[23]对降水数据进行校正。校正结果如表 1 所示,气温及降水误差均在可控范围,表明 HadGEM2 – ES 模式数据能够用来研究气候变化对塔里木河干流未来径流的影响。

表 1　HadGEM2 – ES 模式数据校正结果

Tab. 1　Result of correction of HadGEM – ES data

气象站点	气温误差/℃	降水相对误差/%
阿拉尔	-0.01	1.8
拜城	0.02	1.2
库车	-0.07	0.4
轮台	-0.03	2.4
库尔勒	0.08	3.1
铁干里克	0.02	0.8

2.2　MIKE SHE 模型

MIKE SHE 模型是全分布式且具有物理基础的模型系统,主要用于模拟坡面漫流、河流和湖泊、饱和流和非饱和流、蒸散发、地表水和地下水运动及其交换等方面[24-26]。MIKE SHE 模型基于单元格划分流域:在水平方向上使用规则格网离散空间,垂直方向上利用多水平层诠释各格网内部土壤剖面垂直差异性,基于数值分析方式建立相邻格网要素间的时空关系[27]。该模型主要通过 6 个独立且相互联系的子模块构成:截留/蒸发(ET)、坡面漫流(OL)、河流和湖泊计算模拟(OC)、非饱和带流(UZ)、饱和带流(SZ)、融雪(SM)模块,且每个子模块均对应一个水文过程,用户可根据研究目的自由组合并搭建其模块[28]。

2.3　模型数据输入

MIKE SHE 模型需要输入数据主要包括:DEM、逐日气温、降水数据、土地利用数据和土壤数据等。本文 DEM 采用比例尺为 1∶250 000 的栅格数据(http://srtm. csi. cgiar. org/SELECTION/inputCoord. asp)。气温和降水基准数据来源于国家气象信息中心(http://data. cma. cn/),其中,以干流及周边的 6 个气象站点构建泰森多边形,用以代表整个干流降水,并采用联合国粮农组织推荐的 Penman – Monteith 公式计算干流参考蒸散发值。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www. resdc. cn),其中,将 2005 年划分的 21 类土地利用数据合并为农田、林地、草地、水体、居民点和荒漠 6 类;灌溉制度和灌溉定额参考李杰友[29]针对干旱区水资源优化配置研究的结果,将灌溉面积按水文站点所属区位划分为:阿拉尔—新其满、新其满—英巴扎、英巴扎—恰拉及恰拉以下 4 个典型河段。叶面积指数参照赵成义、韩明等[30-31]针对塔里木河水域调配的研究结果;土壤类型数据来源于寒区旱区科学数据中心(http://www. westgis. ac. cn),将研究区土壤类型划分为:砂壤黏土(sand clay loam)、粉粘壤土(silt loam)、壤粘土(loam clay)、砂土(sand)和粘壤土(clay loam)5 种类型。

本研究采用 FAO 推荐的 Penman – Monteith 公式,对干流 1998—2007 年逐日参考作物蒸散发量进行计算[32]:

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+r\dfrac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+r(1+0.34u_2)} \qquad (1)$$

式中:ET_0 为参照作物蒸散发量($mm \cdot d^{-1}$);R_n 为作物表面上的净辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);$G$ 为土壤热通量($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);$T$ 为 2 m 高处日平均气温(℃);u_2 为 2 m 高处的风速($m \cdot s^{-1}$);e_s 为饱和水汽压(kPa);e_a 为实际水汽压(kPa);Δ 为饱和水汽压曲线斜率;r 为湿度计常数($kPa \cdot ℃^{-1}$)。

表 2　塔里木河干流 MIKE SHE 模型主要输入数据

Tab. 2　Data list of the MIKE SHE model of main stream of Tarim river

数据类型	数据来源	属性
地形	1∶250 000 DEM	1 km×1 km 格网
河网水系	中国地区三级以上河流	*.shp 文件
土地利用	中国科学院资源环境科学数据中心	1 km×1 km 格网
土壤数据	FAO 土壤图	1 km×1 km 格网
降水/气温数据	国家气象信息中心	6 站
径流数据	塔里木河流域管理局	4 站

2.4　模型参数率定

采用 1998—2007 年塔里木河干流日径流数据进行模拟,模型率定期为 1998—2003 年,模型验证期为 2004—2007 年。采用相对误差(RE)、相关系数($CORR$)和纳什系数(NS)等指标评价模型适用性[33]。

$$RE=\frac{\overline{S}-\overline{O}}{\overline{O}}\times100\% \qquad (2)$$

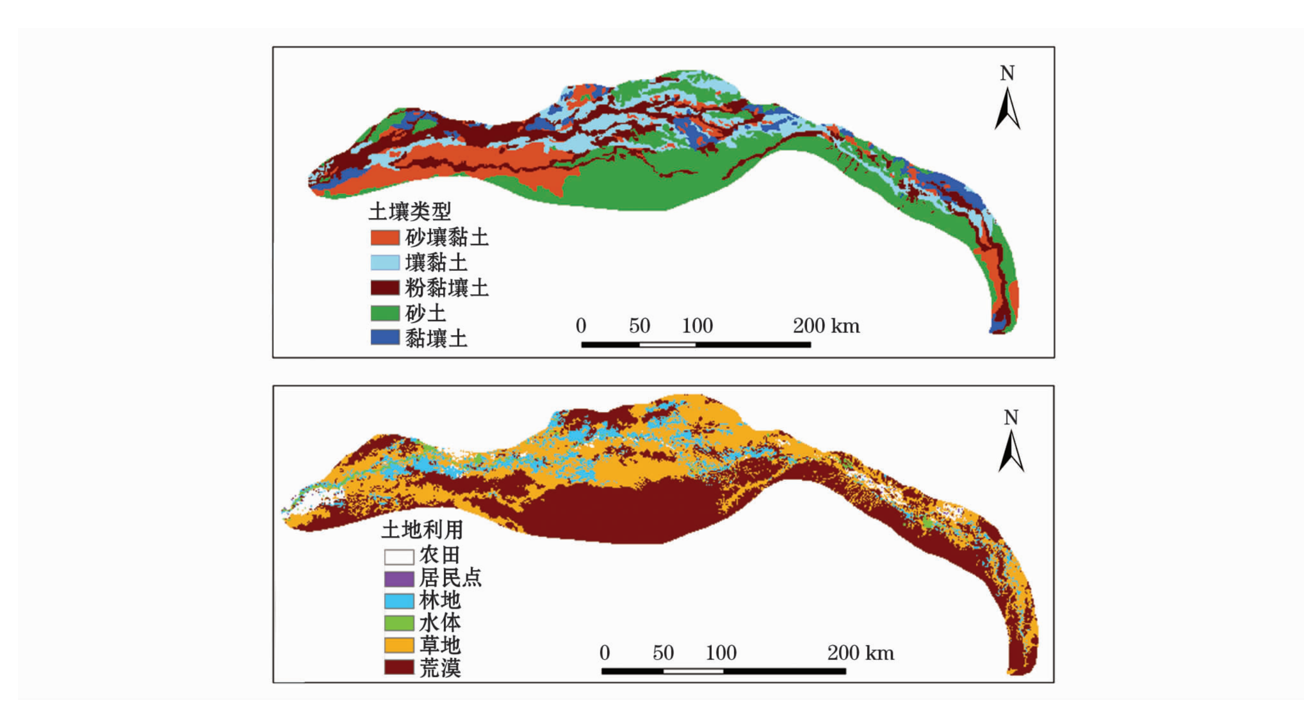


图 2　塔里木河干流土壤类型和土地利用

Fig. 2　Soil types map and landuse map of main stream of Tarim river

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=0}^{n}(S_i - \bar{S})^2}} \quad (3)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=0}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

式中：O_i 表示第 i 天实测径流量，$m^3 \cdot s^{-1}$；$\bar{O}$ 表示实测径流量平均值，$m^3 \cdot s^{-1}$；S_i 表示第 i 天模拟径流量，$m^3 \cdot s^{-1}$；$\bar{S}$ 表示模拟径流量平均值，$m^3 \cdot s^{-1}$。

3　结 果

3.1　模型识别与验证

参考 Refsgaard[25,34] 提出的 MIKE SHE 模型参数化原则，将参数划分为两类：① 实测数据或遥感数据推算所得，该类数据是基于对现实情况的真实描述，存在一定的不确定性，故在目前数据可获取程度无法提高情况下，将降水、参考蒸散发、气温、土地利用及植被等参数不予率定；② 非测量和计算所得，包括河道的 Manning 糙率、河床透水系数、植被参数、土壤与含水层参数等[35]。本文结合以上参数率定原则，将塔里木河干流各水文站 1998—2003 年实测日径流数据用于率定模型，并按照从干流上段至下段依次率定的顺序进行判定，其结果如表 3 所示。

由表 4 可知，率定期各水文站相关系数均≥0.87，纳什系数均≥0.72，相对误差均＜－0.07；验证

表 3　参数率定结果

Tab. 3　Result of values of the calibrated parameters

模 块	参 数	河 段	率定结果
坡面流	曼宁系数	干流	0
河道流	河道糙率系数	干流	30
	河床透水系数	阿拉尔－新其满	1.1×10^{-6}
		新其满－英巴扎	7.0×10^{-7}
		英巴扎－恰拉	7.5×10^{-7}
		恰拉－台特玛湖	7.5×10^{-7}
饱和流	渗透系数	干流	6.8×10^{-5}
	给水度	干流	0.125

表 4　模型结果

Tab. 4　Results of MIKE SHE model

阶段	水文站	相关系数 (*CORR*)	纳什系数 (*NS*)	相对误差 (*RE*)
率定期	新其满	0.97	0.93	－0.07
	英巴扎	0.91	0.73	－0.36
	恰 拉	0.87	0.72	－0.11
验证期	新其满	0.97	0.94	－0.02
	英巴扎	0.94	0.84	－0.21
	恰 拉	0.89	0.79	－0.18

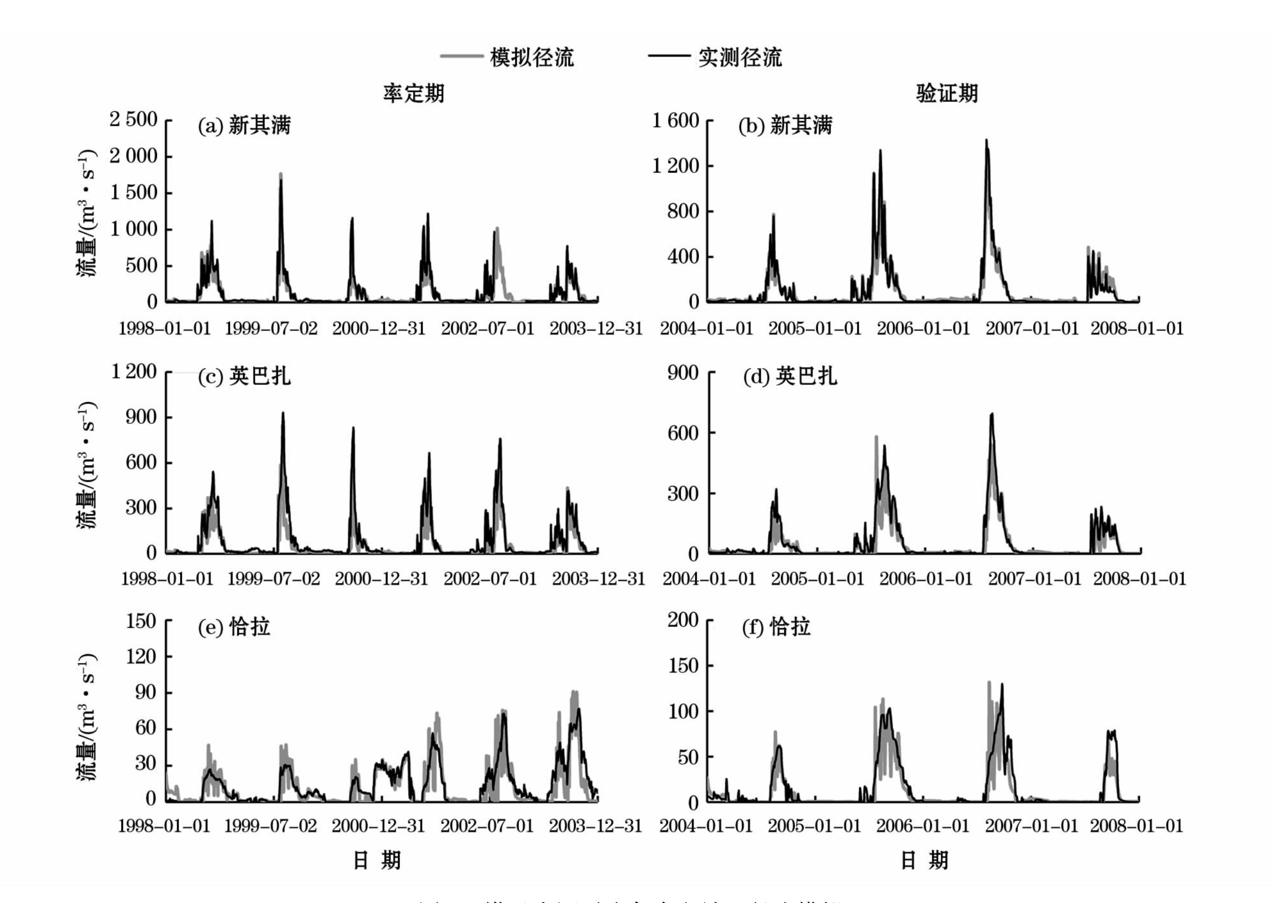


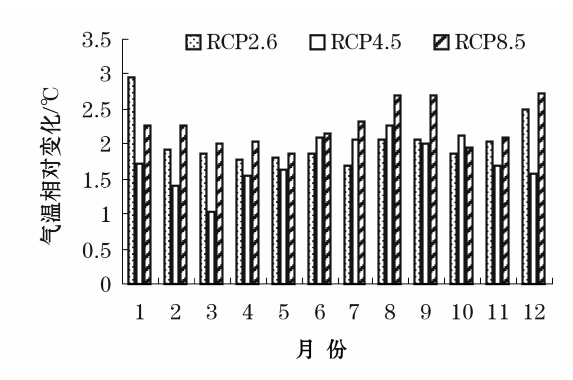
图 3　塔里木河干流各水文站日径流模拟

Fig. 3　Simulation of daily runoff of every station of main stream of Tarim river

期各水文站相关系数均≥0.89,纳什系数均≥0.79。模拟与实测的径流曲线拟合性较好,表明通过率定参数,模型能较为准确地模拟塔里木河干流日径流变化趋势。

3.2　未来气候情景下径流变化预估

本研究将前述的塔里木河干流及周边 6 个气象站点经校正后的 HadGEM2 - ES 模式数据计算其平均值,用以研究干流未来气候情景下气温降水变化的总体趋势。根据图 4 中气温相对变化可知,2021—2050 年塔里木河干流在不同排放情景下多年月平均气温较基准期均呈上升趋势,升温幅度差异显著,集中于 1 ~ 2 ℃间。3 种排放情景下,RCP8.5 情景升温幅度明显高于其他 2 种。从各月升温情况来看,夏秋季节增温较大,升温最大为 1 月份,升温幅度为 1.5 ~ 3 ℃。整体上,2021—2050 年各排放情景较 1981—2004 年基准期多年月平均气温升高趋势明显,夏秋季节增温较大,春冬季节增温较小,整体增温幅度在 1.7 ~ 2.2 ℃间。由图 4 可以看出,塔里木河干流不同情景下 2021—2050 年多年月平均降水较基准期 1981—2004 年多年月平均降



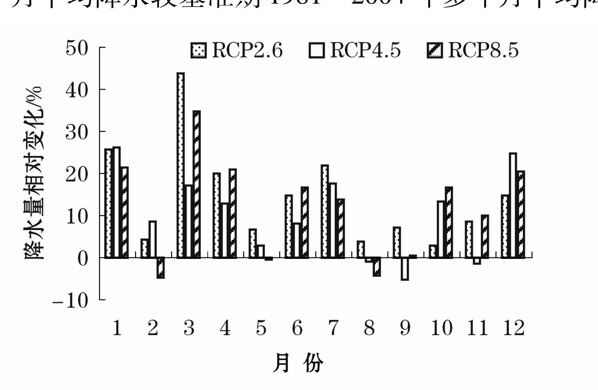


图 4　2021—2050 年塔里木河干流多年月平均气温、降水较基准期变化量

Fig. 4　Change of multi - month mean temperature and precipitation from 2021to 2050 relative to the base period

水呈现春季增幅较大,秋季增加较小趋势。从各月来看,2、5、8、9、11 月有部分气候情景的降水量减少,其他各月各气候情景降水量都是增加的。

由于塔里木河干流是纯耗散性河流,自身不产流,在气候模式下需要计算出阿克苏河、和田河、叶尔羌河总径流量才能作为气候模式下阿拉尔站的输入量,模式情景工作量较大且较难控制。然而,本研究区阿拉尔站 1957—2000 年的多年平均年径流量为 $45.82\times10^8\ m^3$,阿拉尔站 2003 年年径流量达 $44.98\times10^8\ m^3$,这与多年平均径流量较为接近,因此,本文选取阿拉尔站 2003 年径流量为基准期输入模型,同时将 CMIP 5 中 HadGEM2 – ES 情景模拟的 6 个气象站的 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 下降水和最高最低平均气温数据作为模型的输入值,进而驱动 MIKE SHE 模型输出塔里木河干流各水文站径流量。由表 5 和图 5 可知,未来气候情景下,新其满、英巴扎和恰拉 3 个水文站年径流量较基准期 2003 年呈现出减少趋势,其中恰拉水文站减少比例最大,达 5.04%,新其满水文站减少比例最小,达 0.6%。从各气候排放情景可知,在 RCP2.6 情景下各水文站减少量最小,在 RCP8.5 情景下各站减少量最大。由于春冬季节气温增加,蒸发增大,同时春冬季径流量较小,使得各水文站径流量春冬季节减少比例较为显著。夏秋季节增温明显,蒸发加强,各水文站径流量各情景下减少量相对较大,但由于夏秋季节径流量较大,使得相对变化较春冬季节变化微弱。对于降水而言,虽表现为增加趋势,但塔里木河干流降水基本不产生地表径流,是水资源的主要耗散和消耗区。因此,未来气候情景下气温对各水文站径流量相对变化影响较为显著。

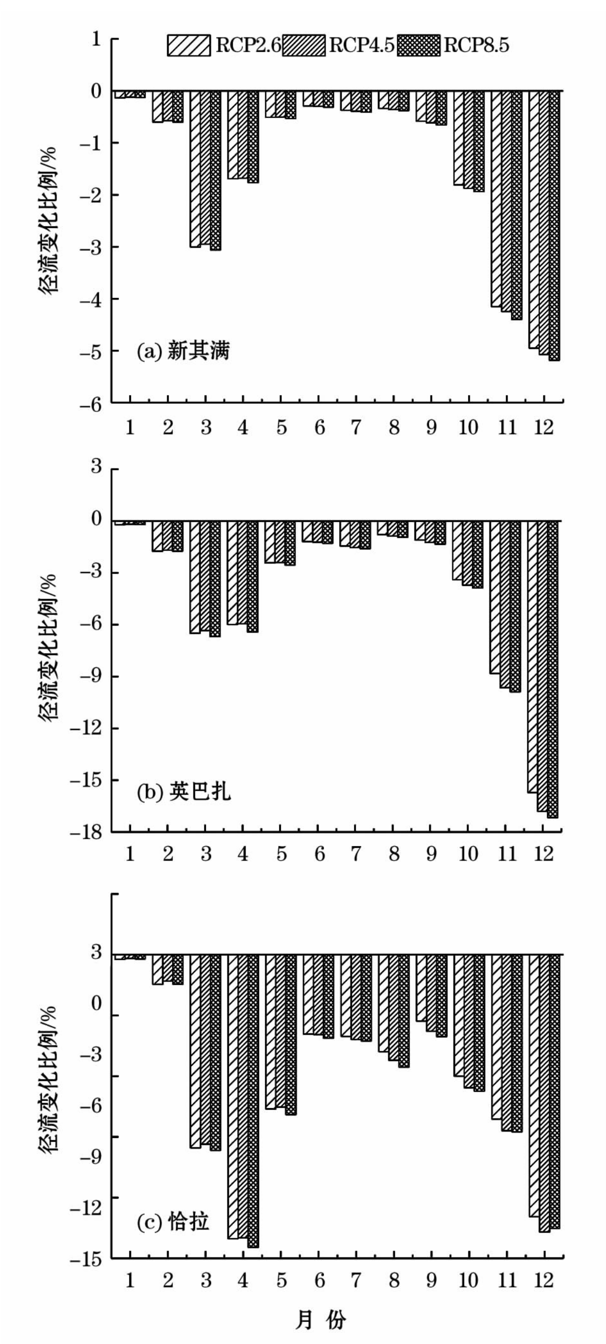


图 5 塔里木河干流 2021—2050 年各水文站多年月平均径流较基准期 2003 年相对变化

Fig. 5 Change of multi – annual monthly mean runoff amount of every station from 2021 to 2050 relative to the base period

表 5 2021 – 2050 年塔里木河干流各水文站多年径流量较基准期 2003 年相对变化(%)

Tab. 5 Change multi – annual mean runoff amount of every station from 2021 to 2050 relative to the base period /%

各气候情景	新其满	英巴扎	恰拉
RCP2.6	-0.60	-1.44	-4.54
RCP4.5	-0.62	-1.54	-4.82
RCP8.5	-0.65	-1.64	-5.04

4 结论与讨论

本文基于 MIKE SHE 模型探究了塔里木河干流日径流变化特征,并结合 HadGEM2 – ES 模式数据对径流响应进行了模拟分析,结果表明:

(1)通过对塔里木河干流径流模拟结果与实测值的验证,率定期塔里木河干流 3 个水文站日径流相关系数均在 0.87 以上,纳什系数均在 0.72 以上;验证期各水文站日径流相关系数均在 0.89 以上,纳什系数均在 0.79 以上,表明,MIKE SHE 水文模型在干流模拟的可行性较好。这与田开迪等[36]利用 MIKE SHE 模型对灞河流域径流模拟的结果相一致,均表明 MIKE SHE 模型对流域模拟具有较好的

适用性,但本文重点针对日径流模拟且模拟效果较好,而田开迪等[36]的研究以年径流为基准,并未探究月径流和日径流模拟效果,其研究区也以半湿润气候为主。因此,针对 MIKE SHE 模型对干旱内陆河流域的适用性,还有待于下一步从月径流、年径流等多尺度综合探究。

(2) 各情景模式下多年月平均气温较基准期呈显著增加趋势,且以夏秋季节增温较大,3 种情景升温幅度在 1.7 ~2.2 ℃;降水在各水文站各情景下呈整体增加趋势,且春季增幅较大,秋季增幅较小,表明未来气候可能将趋于暖—湿状态。这与陶辉等[37]通过采用多模式加权平均数据对塔里木河流域未来气温变化的研究结果相一致,均表明未来气候基于 3 种排放情景下塔里木河流域气温均呈上升趋势,升温幅度均在 2 ℃左右。与此同时,本结果还与罗敏等[33]针对和田河流域未来不同排放情景下春、秋、冬三季降水均增加,夏季降水减少,温度升高且夏季增温最大的研究结果一致。年际尺度下,塔里木河气温和降水均呈不同程度的增加趋势,这与 Liu 等[38]根据 18 种全球气候模式得到的多模式集合平均数据,对喀喇昆仑山地区气温降水的研究结果相一致,均表明在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下气温和降水呈现不同程度的增加趋势。

(3) 3 个水文站径流量均有所减少,其中恰拉水文站减少比例最大,达 5.04% ,新其满水文站减少比例最小,达 0.6% 。由于气温升高,整个干流蒸发加强,使得各水文站径流量呈现出不同程度的减少趋势。各气候排放情景中,RCP2.6 情景下各站减少量最小,RCP8.5 情景下则呈现为最大。未来塔里木河干流由于气温升高,蒸发加强,致使各水文站径流量将趋于减少态势。这与罗敏等[32]针对和田河流域未来不同排放情景下,7—8 月径流量呈不断减少的结果相一致,均表明干旱内陆河干流区未来 30 a 径流量呈减少趋势。这一结果一方面将加剧该区域水资源短缺,给塔里木河干流水资源优化配置带来更大挑战;另一方面将使生态安全形势更加严峻,致使生态稳定性中源性较弱的塔里木河流域面临更大的危机。

(4)本文选择降尺度的方法探究塔里木河干流径流变化过程,然而降尺度方法的选择、模式数据校正方法的选择、单一模型及单一气候模式为依据,研究气候变化对水文水资源和环境的影响都存在较大的不确定性[39],致使模拟预测结果存在一定的误差。因此,提高区域气候变化情景预测精度[22],综合多模式多模型研究方法,探究气候变化对水文水资源的影响,可大大降低预测的不确定性。(5) 本文对于未来 30 a 塔里木河干流各河段径流演变特征的研究,仅将塔里木河干流多年平均年径流量输入模型,未能考虑丰水年、枯水年各河段径流变化情况,下一步将利用构建的塔里木河干流径流模型,结合以上数据进行丰水年、枯水年各径流演变方面的探究,进一步完善塔里木河干流水资源合理配置及水资源评价。

致谢:感谢审稿专家对本文修改所提出的建设性意见和编辑人员耐心细致的指导。

参考文献(References):

〔1〕 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟〔J〕.生态学报,2017,37(4):1 252 – 1260.〔Li Shuai,Wei Hong,Liu Yuan,et al. Runoff prediction for Ningxia Qingshui River Basin under scenarios of climate and land use changes〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2017,37(4):1 252 – 1 260.〕

〔2〕 李忠勤,李开明,王林.新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究〔J〕.第四纪研究,2010,30(1):96 – 106.〔Li Zhongqin,Li Kaiming,Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in xinjiang,north western China〔J〕. Quaternary Sciences,2010,30(1):96 – 106.〕

〔3〕 Matondo J I,Peter G,Msibi K M. Evaluation of the impact of climate change on hydrology and water resources in Swaziland: Part I〔J〕. Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C,2004,29(15/18):1 181 – 1 191.〔4〕 孟丽红,陈亚宁,李卫红.新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究〔J〕.中国沙漠,2008,28(1):185 – 190.〔Meng Lihong,Chen Yaning,Li Weihong. Study of water resources carrying capacity in Tarim River basin of Xinjiang〔J〕. Journal of Desert Research,2008,28(1):185 – 190.〕

〔5〕 Abushandi E,Merkel B. Modelling rainfall runoff relations using HEC – HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan〔J〕. Water Resources Management,2013,27(7):2 391 – 2 409.

〔6〕 Worku T,Khare D,Tripathi S K. Modeling runoff – sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed〔J〕. Environmental Earth Sciences,2017,76(16):550.

〔7〕 黄粤,陈曦,包安明,等.干旱区资料稀缺流域日径流过程模拟〔J〕.水科学进展,2009,20(3):332 – 336.〔Huang Yue,Chen Xi,Bao Anming,et al. Daily flow modeling in arid ungauged basin〔J〕. Advances in Water Science,2009,20(3):332 – 336.〕

〔8〕 张永勇,张士峰,翟晓燕,等.气候变化下石羊河流域径流模拟与影响量化〔J〕.资源科学,2013,35(3):601 – 609.〔Zhang Yongyong,Zhang Shifeng,Zhai Xiaoyan,et al. Runoff simulation on the impact of climate change in the Shiyang River Basin〔J〕. Resources Science,2013,35(3):601 – 609.〕

〔9〕 郑捷,李光永,韩振中,等.改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用〔J〕.水利学报,2011,42(1):88 – 97.〔Zheng Jie, Li Guangyong,Han Zhenzhong,et al. Application of modified SWAT model

in plain irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(1):88 -97.]

[10] Christensen N S, Wood A W, Voisin N, et al. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin[J]. Climatic change, 2004, 62(1/3):337 -363.

[11] Setegn S G, Rayner D, Melesse A M, et al. Impact of climate change on the hydroclimatology of Lake Tana Basin, Ethiopia[J]. Water Resources Research, 2011, 47(4):1 -13.

[12] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I 城市水文效应[J]. 水科学进展,2014,25(4):594 -605. [Zhang Jianyun, Song Xiaomeng, Wang Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization[J]. Advances In Water Science, 2014, 25(4):594 -605.]

[13] 刘昌明,刘小莽,郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学对社会的影响,2008(2):21 -27. [Liu Changming, Liu Xiaomang, Zheng Hongxing. Research progress of climate change influence on hydrology and water resources[J]. Impact of Science on Society, 2008(2):21 -27.]

[14] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1 295 -1 304. [Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9):1 295 -1 304.]

[15] 邓铭江. 中国塔里木河治水理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2009. [Deng Mingjiang. Theory and Practice of Harnessing of the Tarim River, China[M]. Beijing: Science Press, 2009.]

[16] 苟树生,张雄文,王彦国,等. 近50年来塔里木河干流水量、水质及耗水分析[J]. 干旱区研究,2010,27(6):861 -870. [Gou Shusheng, Zhang Xiongwen, Wang Yanguo, et al. Analysis on runoff volumes, water quality and water consumption of the tarim river in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(6):861 -870.]

[17] 胡春宏,王延贵,郭庆超,等. 塔里木河干流河道演变与整治[M]. 北京:科学出版社,2005. [Hu Chunhong, Wang Yangui, Guo Qingchao, et al. Fluvial process and regulation of the main stem tarim river[M]. Beijing: Science Press, 2005.]

[18] 施枫芝,赵成义,叶柏松,等. 基于 PTFs 的干旱地区土壤饱和导水率的尺度扩展[J]. 中国沙漠,2014,34(6):1 584 -1 589. [Shi Fengzhi, Zhao Chengyi, Ye Baisong, et al. The scaling - up of soil saturated hydraulic conductivity based on PTFs in arid area [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6):1 584 -1 589.]

[19] 孙美琴,赵成义,施枫芝,等. 近 20 a 塔里木河干流区土地利用变化特征[J]. 干旱区研究,2013,30(1):16 -21. [Sun Meiqin, Zhao Chengyi, Shi Fengzhi, et al. Analysis on land use change in the mainstream area of the Tarim River in recent 20 years[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(1):16 -21.]

[20] 邓铭江,周海鹰,徐海量,等. 塔里木河干流上中游丰枯情景下生态水调控研究[J]. 干旱区研究,2017,34(5):959 -966. [Deng Mingjiang, Zhou Haiying, Xu Hailiang, et al. Regulation of ecological water volume under high or low flow in the mainstream area of the tarim river[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5):959 -966.]

[21] Van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: an overview[J]. Climatic change, 2011, 109(1 -2):5 -31.

[22] 陆桂华,杨烨,吴志勇,等. 未来气候情境下长江上游区域积雪时空变化分析——基于 CMIP5 多模式集合数据[J]. 水科学进展,2014,25(4):484 -493. [Lu Guihua, Yang Ye, Wu Zhiyong, et al. Temporal and spatial variations of snow depth in regions of the upper reaches of Yangtze River under future climate change scenarios: A study based on CMIP5 multi - model ensemble projections[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4):484 -493.]

[23] 赵芳芳,徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析[J]. 气象学报,2007,65(4):653 -662. [Zhao Fangfang, Xu Zongxue. Comparative analysis on downscaled climate scenarios for headwater catchment of yellow river using SDS and Delta methods[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4): 653 -662.]

[24] Devia G K, Ganasri B P, Dwarakish G S. A review on hydrological models[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4:1 001 -1 007.

[25] Refsgaard J C, Knudsen J. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models[J]. Water Resources Research, 1996, 32(7):2 189 -2 202.

[26] Sultana Z, Coulibaly P. Distributed modelling of future changes in hydrological processes of Spencer Creek watershed[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(8):1 254 -1 270.

[27] 王盛萍. 典型小流域土地利用与气候变异的生态水文响应研究[D]. 北京:北京林业大学,2007. [Wang Shengping. Eco - hydrological Response of Small Watershed to Land Use Change and Climate Variation [D]. Beijing : Beijing Forestry University, 2007.]

[28] 李静,焦树林,梁虹,等. 基于 MIKE SHE 分布式水文模型的降水时间尺度对喀斯特流域径流模拟的影响研究——以红水河系六硐河流域为例[J]. 中国岩溶,2012,31(4):388 -394. [Li Jing, Jiao Shulin, Liang Hong, et al. Research on the impact on runoff by time - scale of the precipitation in karst basin in view of MIKE SHE model: A case in Liudong river of the Hongshuihe system[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(4):388 -394.]

[29] 李杰友. 干旱区水资源优化配置与应急调配关键技术[M]. 南京:东南大学出版社,2013. [Li Jieyou. Optimal Allocation of Water Resources in the Arid and the Emergency Deployment of Key Technologies[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2013.]

[30] 赵成义,胡顺军. 中国生态系统定位观测与研究数据集 · 农田生态系统卷 · 新疆阿克苏站(1999—2007)[M]. 北京:中国农业出版社,2010. [Zhao Chengyi, Hu Shunjun. China of Ecosystem Observation and Research Data Sets · Farmland Eco - system · Aksu, Xinjiang (1999 - 2007) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2010.]

[31] 韩明. 塔里木河干流生态过程与水文过程耦合关系模拟研究[D]. 中国科学院大学,2015. [Han Ming. Study the Coupled Relationship of Ecological Process and Hydrological Process in Main Tarim River [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]

[32] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998, 300(9):D05109.

[33] 罗敏,刘铁,黄粤,等. 未来气候情景下和田河流域日径流过程模拟[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):11 -17. [Luo Min, Liu Tie, Huang Yue, et al. Simulation of daily runoff process

in Hotan river basin under scenario of future climate〔J〕. Journal of Water Resources and Water Engineering,2016,27(2):11 – 17.〕

〔34〕 Refsgaard J C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models〔J〕. Journal of hydrology, 1997, 198 (1/4):69 – 97.

〔35〕 黄粤,陈曦,包安明,等. 开都河流域山区径流模拟及降雨输入的不确定性分析〔J〕. 冰川冻土,2010,32(3):567 – 572. 〔Huang Yue, Chen Xi, Bao Anming, et al. Distributed hydrological modeling in Kaidu Basin: MIKE – SHE model calibration and uncertainty estimation〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010,32(3):567 – 572.

〔36〕 田开迪,沈冰,贾宪. MIKE SHE 模型在灞河径流模拟中的应用研究〔J〕. 水资源与水工程学报,2016,27(1):91 – 95.〔Tian Kaidi, Shen Bing, Jia Xian. Application of MIKE SHE model in runoff sumulation of Bahe river basin〔J〕. Journal of Water Resources & Water Engineering,2016,27(1):91 – 95.〕

〔37〕 陶辉,白云岗,毛炜峄. 塔里木河流域气候变化及未来趋势预估〔J〕. 冰川冻土,2011,33(4):738 – 743.〔Tao Hui, Bai Yungang, Mao Weiyi. Observed and projected climate changes in Tarim River Basin〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33 (4):738 – 743.〕

〔38〕 Jiao Liu, Min Luo, Tie Liu, et al. Local Climate Change and the Impacts on Hydrological Processes in an Arid Alpine Catchment in Karakoram〔J〕. Water, 2017, 9(5):344.

〔39〕 张世法,顾颖,林锦. 气候模式应用中的不确定性分析〔J〕. 水科学进展,2010,21(4):504 – 511.〔Zhang Shifa, Gu Ying, Lin Jin. Uncertainty analysis in the application of climate models〔J〕. Advances in Water Science,2010,21(4):504 – 511.〕

Simulation Research of Daily Runoff Process in main stream of Tarim River under Scenario of Future Climate

BAN Chunguang1,2, TAO Hui1, DONG Yiyang2,3,4, ZHAO Chengyi ＊1

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049;
3. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
4. *State Key Laboratory of Simulation Regulation of Water Cycle River Basin, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Taking main stream of Tarim River as research area, applying hydrological model of distributed MIKE SHE, various underlying surface parameters of main stream of Tarim River under daily value dimensions were identified, six meteorological stations (Alar, Baicheng, Kuche, Luntai, Kuerle, Tieganlike) observed datas from 1998 – 2007 were used, the observed discharge at three hydrometric stations (Xin Qiman, Ying Bazha, and Chara) observed datas from 1998 – 2007 were used for the calibration and validation, and combining the air temperature and rainfall data in climate model of HadGEM 2 – ES, so as to estimate the future (2021 to 2050) runoff evolvement features of main stream of Tarim River under climate scenarios. The results indicated that: 1. The model of MIKE SHE was adopted to simulate runoff process of main stream of Tarim River, with model efficiency coefficients over 0.72, which showed that this model had a strong applicability. 2. In the future 30 years, the monthly average temperature of main stream of Tarim River will be increased by 1.7 – 2.2℃ compared with that during the baseline period (1981 to 2004), with obvious temperature rise in summer and autumn. The rainfall overall showed an increasing trend with a higher increase in spring and lower increase in autumn. 3. Under the future climate scenarios, annual runoff volume of various hydrometric stations shows decreasing tendency, with obvious decrease in summer and autumn ($P < 0.01$). The downstream Chara hydrometric station has the biggest decrease rate (5.04%), while the upstream Xin Qiman hydrometric station presents the opposite (0.6%). In emission scenarios under various climates, as opposite to various hydrometric stations with RCP 8.5, that with RCP 2.6 has the smallest decrease rate. The annual runoff of main stream of Tarim River under the future climate scenarios showed decreasing tendency, causing greater difficulties in allocating the regional water resources and greater threat to the ecological security. In the meanwhile, the contradictions of regional man – earth relationship will also be aggravated.

Key words: Daily runoff model; Main stream of Tarim River; Climate change; MIKE SHE